

L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | CHIMIE

Martine Poux
Patrick Cognet
Christophe Gourdon

GÉNIE DES PROCÉDÉS DURABLES

Du concept à la concrétisation
industrielle

DUNOD

AVANT-PROPOS

Depuis une dizaine d'années, a commencé une mutation du monde industriel vers une industrie plus propre, plus sûre, plus respectueuse de l'environnement.

Cette mouvance a été impulsée par une prise de conscience au niveau mondial de la société, qui s'est traduite par la notion de *sustainable development*, bien connu sous le vocable « développement durable ». En effet, dès 1980, l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN) introduit pour la première fois ce terme (qui sera traduit à l'époque par développement soutenable). Il ne sera repris qu'en 1987, dans le rapport de Madame Brundtland (ayant pour titre *Notre Avenir à Tous*), à l'époque Premier ministre en Norvège et présidente de la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement. Elle s'attacha à définir ce concept de Sustainable Development par « un développement qui répond au besoin du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». Depuis cette date, le concept de développement durable a été adopté dans le monde entier.

En ce qui concerne l'industrie de procédés, si la sensibilisation à cette démarche a été amorcée dès les années 1990, il n'en reste pas moins que ce sont les contraintes récentes, imposées notamment par REACH, couplées à une sensibilisation des individus, à une évolution des mentalités et à une intégration des risques encourus, qui ont été parmi les éléments déclencheurs, à l'origine de cette profonde mutation de l'industrie.

Concilier progrès industriels et économiques tout en conservant et respectant l'équilibre naturel de la planète est devenu un véritable challenge. Dans ce paysage, le domaine du Génie des Procédés est bien entendu impliqué au premier plan. Il existe un besoin urgent de procédés plus acceptables du point de vue de la préservation de l'environnement. Cette tendance vers ce qui est maintenant connu sous la dénomination de « Green Process Engineering », que nous avons traduit, un peu improprement mais dans un souci de simplification, par le terme « Génie des Procédés durables », nécessite une évolution des concepts traditionnels d'efficacité des procédés, qui, en plus du classique rendement chimique, tiennent compte de la valeur économique des déchets (recyclage), de l'intérêt de les éliminer à la source et du fait d'éviter l'utilisation de substances toxiques ou dangereuses. Dans cette optique, les principes de la « chimie verte » introduisent bien ce caractère préventif, avec le souci de privilégier la prévention de la pollution par rapport à l'élimination des déchets.

La clé du développement de procédés acceptables du point de vue de la préservation de l'environnement réside dans une large substitution des technologies anciennes par l'utilisation de milieux de synthèse innovants, de techniques d'activation des réactions, parmi lesquelles les catalyses tiennent une place particulière. Cette apparition de nouveaux outils pour la synthèse s'accompagne d'une évolution des procédés pour les mettre en œuvre.

Il est donc absolument indispensable de former, d'informer, de sensibiliser les ingénieurs, techniciens expérimentés aux moyens dont ils disposent pour œuvrer vers ce nouveau concept de procédés durables dans leur vie professionnelle. C'est aussi grâce à la formation intégrée en 2^{ème} et 3^{ème} cycle scientifique que recevront les étudiants et à la diffusion qu'ils en feront dans leur futur environnement, que l'industrie évoluera. Ce sont ces motivations qui nous ont poussés à éditer ce livre, première publication du genre. Cet ouvrage s'adresse donc aux chercheurs et enseignants-chercheurs, étudiants et ingénieurs et techniciens confirmés. Il pourra constituer un support de cours et de formation.

Rédigé par des enseignants-chercheurs et chercheurs qui travaillent en partenariat étroit avec le milieu industriel, cet ouvrage a pour objectif de fournir les clés pour la mise en œuvre de procédés durables. Trois voies différentes mais complémentaires sont décrites ici et constituent les trois premières parties de ce livre. Elles apparaissent dans un ordre qui va dans le sens d'une complexification croissante du procédé, c'est-à-dire en partant de l'amélioration du procédé existant, puis en envisageant un changement de technologies, et enfin en cherchant à mettre en œuvre de nouvelles voies de synthèse. Une quatrième et dernière partie propose une ouverture vers des voies plus innovantes et plus prospectives.

Jean-Claude Charpentier nous a fait l'honneur de composer l'introduction générale. Expert incontournable dans le domaine du Génie des Procédés qui jouit d'une notoriété mondiale, il nous livre ses propos visionnaires sur le Génie des Procédés moderne.

La première partie intitulée «Outils pour l'ingénierie des procédés durables» regroupe trois chapitres autour des outils et méthodes disponibles i) pour intégrer au mieux les critères sociaux et environnementaux en plus des critères classiques techniques et économiques dans la conception des procédés ii) pour optimiser les procédés, iii) pour modéliser les procédés avec des outils de conception assistée par ordinateur proposant une plus grande flexibilité en vue d'intégrer les nouveaux dispositifs technologiques. L'approche ici se situe à un niveau global, celui de la chaîne de production.

Dans la deuxième partie «Technologies et méthodes innovantes d'intensification», l'intensification des procédés est abordée en premier lieu d'un point de vue technologique : les chapitres 4 et 5 décrivent respectivement i) les systèmes miniaturisés qui offrent par rapport à l'existant une amélioration de la qualité de production de par la diminution significative du rapport taille/capacité, une diminution de l'énergie consommée et une diminution de la quantité de rejets, et ii) les réacteurs multifonctionnels, équipement performant dû à l'intégration synergétique de plusieurs fonctions. Les chapitres suivants 6 et 7 sont consacrés aux méthodes d'intensification de la réaction chimique elle-même ou bien des phénomènes de transfert. On y trouvera l'apport des ultrasons et des micro-ondes en vue de l'amélioration du rendement, de la sélectivité dans des opérations comme l'extraction, la réaction ainsi qu'une approche par la formulation, plus particulièrement en mettant en œuvre les milieux microémulsions.

La troisième partie est consacrée aux «Nouvelles générations de procédés», même si certains d'entre eux ne peuvent pas être réellement considérés comme très récents. Dans ces cas là, il s'agit alors de revisiter ces opérations et de les appliquer dans un objectif de développement de procédés durables. Les trois premiers chapitres de cette partie abordent les nouveaux milieux : les fluides supercritiques qui sont utilisés comme solvant ou bien en tant que milieu réactionnel (chapitre 8), les liquides ioniques (chapitre 9) et l'eau et les réactions sans solvants (chapitre 10). Ces chapitres sont assez orientés vers la chimie, discipline souvent 'source' pour l'ingénieur de procédé. Ils rassemblent les dernières avancées scientifiques sur lesquelles reposeront les procédés de production de demain. Les procédés plus classiques comme le génie électrochimique (chapitre 11), le génie photocatalytique (chapitre 12), la biocatalyse et les bioprocédés (chapitre 13) ainsi que la catalyse (chapitre 14) s'appuient sur les disciplines de base et ont été reconsidérés en s'ouvrant vers de nouvelles applications tout en répondant aux besoins environnementaux. Le lecteur trouvera dans chacun de ces chapitres des notions théoriques approfondies et de nombreux exemples d'applications.

Une quatrième et dernière partie rassemble deux chapitres autour du thème «Quelques voies prometteuses». Le chapitre 15 présente un développement sur le matériau cellulose, sa structure et les champs d'application de la fibre cellulosique. On y voit ici un exemple d'exploitation d'un biomatériau, autre piste qui s'inscrit dans le concept de procédés durables. Puis, le dernier chapitre (chapitre 16) s'inscrit dans une rupture totale : il propose la modélisation moléculaire comme outil pour étudier les phénomènes microscopiques limitant les performances des procédés, plaçant ainsi la molécule au cœur du système. La rencontre entre les sciences du

génie des procédés et la modélisation moléculaire semble offrir de belles perspectives scientifiques au service du génie des procédés durables.

Le lecteur puisera ici au gré des chapitres indépendants, des concepts, des pistes, des idées... pour la conception des procédés de production de demain. Discipline émergente, en pleine évolution, le Génie des Procédés Durables se construit pour répondre au mieux aux besoins économiques, sociétaux et environnementaux de la planète.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	VII
Introduction générale	1

A

Outils pour l'ingénierie des procédés durables

1 • Méthodologie de conception de procédés durables : une approche multicritère	19
1.1 Concept de développement durable en Génie des Procédés	19
1.2 Frontières du système	20
1.3 Conception de procédés durables	22
1.4 Conclusion	35
1.5 Bibliographie	15
2 • Stratégies d'optimisation du procédé	38
2.1 Introduction	38
2.2 Exemples d'études et types d'optimisation résultants	39
2.3 Méthodes d'optimisation	45
2.4 Conclusion	53
2.5 Bibliographie	55
3 • Représentation et modélisation des procédés	58
3.1 Introduction	58
3.2 Aspect informatique	59
3.3 Représentation des phénomènes par les graphes de liaison ou « Bond Graph »	60
3.4 Application des graphes de liaison au génie des procédés : cas des systèmes de dimension finie	65

3.5 Application des graphes de liaison au génie des procédés : cas des systèmes de dimension infinie	77
3.6 Conclusion générale	81
3.7 Bibliographie	81

B

Technologies et méthodes innovantes d'intensification

4 • Miniaturisation des procédés	86
4.1 Introduction	86
4.2 Principes de l'intensification par miniaturisation	87
4.3 Mélangeurs, contacteurs et échangeurs miniaturisés	96
4.4 Quelques exemples d'applications industrielles	109
4.5 Conclusions et perspectives	111
4.6 Bibliographie	112
5 • Les réacteurs multifonctionnels	115
5.1 Introduction	115
5.2 Les réacteurs-échangeurs	118
5.3 Distillation réactive	128
5.4 Conclusion	145
5.5 Bibliographie	145
6 • Techniques d'activation par ultrasons et micro-ondes	150
6.1 Apport des ultrasons dans les procédés	150
6.2 L'énergie micro-ondes dans les procédés	167
6.3 Couplage entre techniques d'activation	191
6.4 Conclusion	195
6.5 Bibliographie	196
7 • Intensification par la formulation	201
7.1 Introduction	201
7.2 Concepts physico-chimiques de la formulation	201
7.3 Applications en réactivité	209

7.4 Conclusion	224
7.5 Bibliographie	225

C

Nouvelles générations de procédés

8 • Les fluides supercritiques	231
8.1 Généralités sur les fluides supercritiques	231
8.2 Le CO ₂ , le fluide supercritique pertinent pour le développement durable	234
8.3 Les grands domaines d'application	236
8.4 Thermodynamique des mélanges haute pression	240
8.5 Architecture générale d'un procédé supercritique	243
8.6 Conclusions et perspectives	248
8.7 Bibliographie	248
9 • Les liquides ioniques	251
9.1 Que sont les liquides ioniques ?	251
9.2 Utilisation des liquides ioniques comme solvant	258
9.3 Les Liquides Ioniques à Tâches Spécifiques (LITS) et Sels d'Onium à Tâches Spécifiques (SOTS)	263
9.4 Conclusion	273
9.5 Bibliographie	273
10 • L'eau comme solvant et réactions sans solvant	276
10.1 L'eau comme solvant	276
10.2 Les réactions sans solvant	289
10.3 Bibliographie	303
11 • Procédés électrochimiques pour un développement durable	307
11.1 Introduction	307
11.2 Rappels d'électrochimie et de génie électrochimique	309

11.3 Électrosynthèse organique	323
11.4 Procédés électrochimiques de génération d'oxydants puissants et de désinfection	329
11.5 Bibliographie	332
12 • Génie photocatalytique	335
12.1 Introduction	335
12.2 Historique	335
12.3 Principes Fondamentaux	336
12.4 Nature des réactions photocatalytiques	343
12.5 Applications environnementales	345
12.6 Photocatalyse en chimie fine	358
12.7 Génie photocatalytique académique	359
12.8 Conclusions et perspectives	361
12.9 Bibliographie	362
13 • Biocatalyse et Bioprocédés	365
13.1 Introduction	365
13.2 Biocatalyseurs et ingénierie de biocatalyseurs	366
13.3 Atouts de la biocatalyse pour les procédés durables	370
13.4 Ingénierie de bioprocédés	373
13.5 Technologies et mises en œuvre de bioréacteurs	376
13.6 Modélisation de bioréacteurs enzymatiques et cellulaires	380
13.7 Exemples de simulation et d'optimisation de bioprocédés	384
13.8 Bibliographie	389
14 • Apports de la catalyse à une chimie durable	390
14.1 Introduction	390
14.2 Sélectivité, économie d'atomes	391
14.3 Énergie	393
14.4 Utilisation de la biomasse comme vecteur énergétique	404
14.5 Catalyse environnementale	407
14.6 Bibliographie	409

D

Quelques voies prometteuses

15 • Structure et ingénierie du matériau cellulose	413
15.1 Introduction	413
15.2 Structure et architecture de la cellulose	414
15.3 Les enjeux de demain ? Une économie basée sur la cellulose	426
15.4 Conclusion	438
15.5 Bibliographie	439
16 • Conception produit-procédé assistée par ordinateur	443
16.1 Objectifs	443
16.2 Mettre en œuvre la conception Produit-procédé	448
16.3 Être au cœur d'un laboratoire de génie des procédés, ouvert à l'interdisciplinarité	466
16.4 Bibliographie	467
Index	471

OUTILS POUR L'INGÉNIERIE DES PROCÉDÉS DURABLES

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Quelques critères environnementaux (liés par exemple aux émissions) et sociaux (liés par exemple à la sécurité) ont certes déjà été intégrés dans des environnements de simulation tels que Chemcad (Chemstations, 2003) et permettent l'évaluation d'impacts environnementaux incluant le réchauffement climatique, la destruction de la couche d'ozone, l'acidification... Néanmoins, cette étape est souvent réalisée lorsque les composantes techniques et économiques ont été finalisées. Une telle approche peut ainsi conduire à une performance environnementale sous-optimale puisque les choix de conception s'avèrent plus limités dans les phases ultérieures de la conception de l'unité et risquent de compromettre des voies de procédés plus « durables » vis-à-vis de la composante environnementale. De plus, dans un certain nombre d'approches, même s'ils sont intégrés à la phase de conception, les critères environnementaux sont souvent pris en compte au niveau imposé par la législation et concernent quasi-exclusivement les contributions directes de l'unité, sans considération des impacts amont et aval. Ainsi, le concepteur peut aboutir à un schéma d'unité qui réduit les impacts environnementaux de ce procédé particulier, lequel peut accroître l'impact amont (par exemple à travers un choix de matières premières et de sources d'énergie non-durables) et donc global.

La conception de procédés durables nécessite ainsi une approche systémique dans laquelle les aspects liés au développement durable doivent être de façon inhérente intégrés à la phase de conception. En pratique, cela signifie que les critères environnementaux et sociaux doivent être pris en compte dès la phase de conception, en plus des critères traditionnels, techniques et économiques, nécessitant une approche pluridisciplinaire (figure 1.2).



Figure 1.2 – Critères considérés pour la conception de procédés durables

L'objectif de ce chapitre est de montrer quelles sont les nouvelles frontières du système d'étude lorsqu'on s'intéresse à la conception durable d'un procédé, à quel stade les différents critères de sélection du procédé doivent être pris en compte et comment les quantifier pratiquement. Il se situe donc sur un plan méthodologique afin de guider le concepteur dans sa démarche, face à l'abondante littérature sur le développement durable et ses applications dans le domaine des procédés : citons les ouvrages synthétiques de (Azapagic *et al.*, 2004 ; Dewulf et Van Langenhove, 2006 ; Abraham, 2006 ; Allen et Shonnard, 2001 ; ce dernier étant plus axé sur la composante environnementale).

1.2 Frontières du système

Les ingénieurs de procédés sont familiers avec l'approche système qui était la conception : le procédé d'intérêt est défini comme un système autour duquel une frontière délimite tous les éléments le constituant et leurs interactions (figure 1.3).

Traditionnellement, la frontière du système borne le procédé, sans considérer les activités amont et aval. De plus, la conception reste le plus souvent ciblée sur les éléments qui affecteront l'exploitation du procédé au stade suivant et ne s'intéresse pas à la construction de l'unité

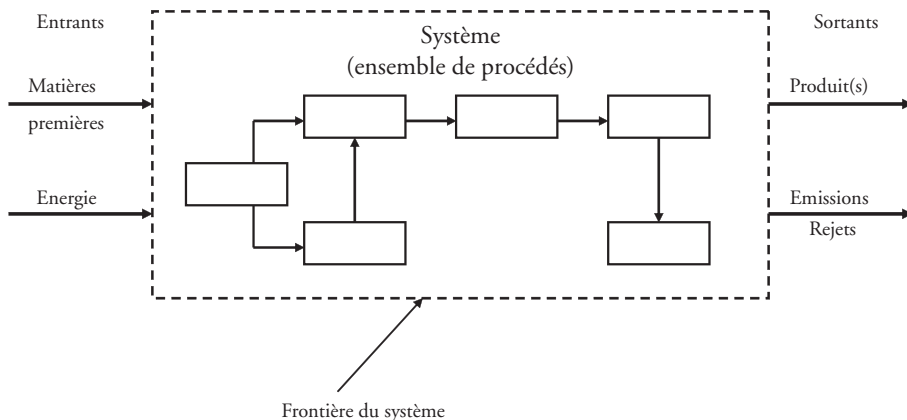


Figure 1.3 – Approche système et frontière du système en conception classique de procédés

et à son démantèlement, lesquels ont un fort impact économique, environnemental et social, ce qui peut conduire globalement à des mauvaises appréciations des différents critères. Prenons pour illustration le cas de l'hydrogène considéré comme un « combustible propre ». Si l'on considère une limite étroite autour du procédé (approche « porte-à-porte » ou « gate-to-gate »), une pile à combustible alimentée en hydrogène a une efficacité relativement modérée (rendement électrique de l'ordre de 50-60 %) mais est attractive en tant que système « zéro-émission ». Cependant, l'hydrogène n'est pas une source mais un vecteur énergétique et sa production nécessite une quantité substantielle d'énergie. À l'heure actuelle, les procédés de production d'hydrogène utilisés font intervenir des matières premières non-renouvelables sans procédé associé de traitement ou de séquestration du CO_2 émis (75 % de l'hydrogène est actuellement produit par reformage à la vapeur du méthane). Si l'on considère ce type de mode de production, l'hydrogène n'apparaît plus comme un vecteur énergétique durable en élargissant les frontières (approche « du berceau-au portail » ou « cradle-to-gate »). Une analyse plus rigoureuse (figure 1.4) implique une prise en compte globale de l'analyse du cycle de vie, (approche « du berceau-à la tombe » ou « cradle-to-grave ») (Azapagic, 1999; Azapagic et Clift, 1999; Azapagic *et al.*, 2004; Azapagic *et al.*, 2006).

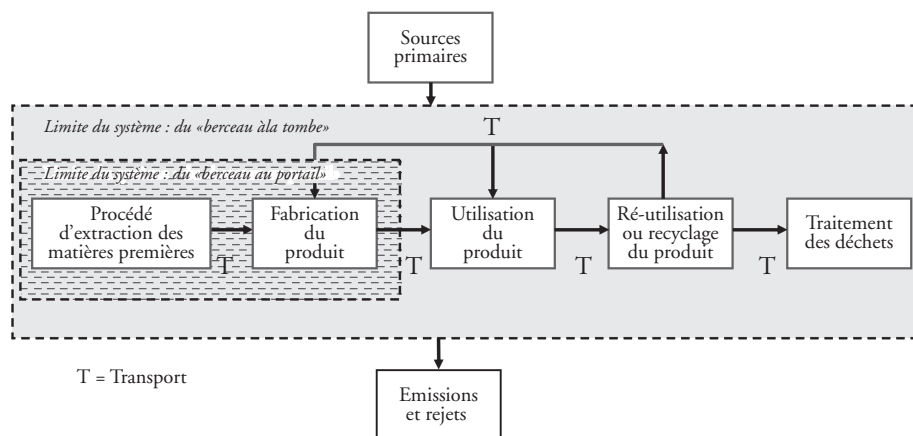


Figure 1.4 – Étapes dans le cycle de vie d'un produit

Notons qu'une approche intégrée de la réduction de la pollution qui consiste à prévenir les émissions dans l'air, l'eau, le sol, en prenant en compte également la gestion des déchets est de plus en plus requise par la législation. Ainsi, la directive 96/61/CE du Conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (directive dite « IPPC » pour *Integrated Pollution Prevention and Control*) a pour objet d'imposer une approche globale de l'environnement pour la délivrance des autorisations des grandes installations industrielles (EC, 1996).

Ce type d'analyse, appliqué au cycle de vie d'un procédé, implique notamment les étapes de construction, d'exploitation et de démantèlement de l'unité (figure 1.5).

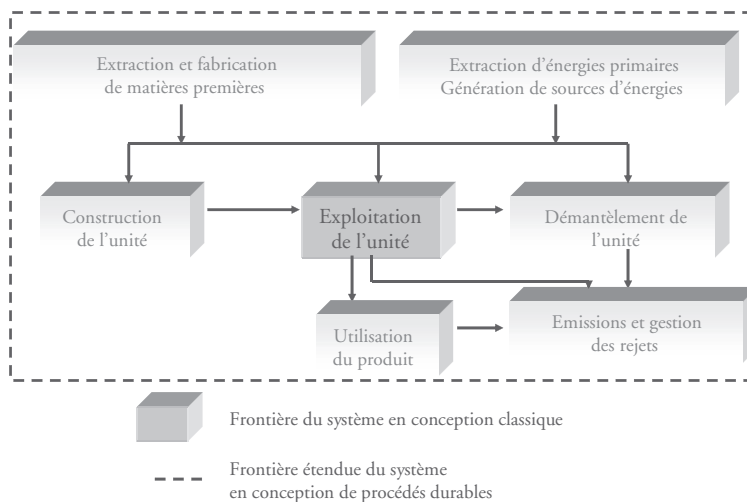


Figure 1.5 – Approche système et frontière du système en conception classique de procédés

1.3 Conception de procédés durables

Les approches de conception de procédés peuvent varier selon les pratiques industrielles. Néanmoins, elles impliquent généralement les étapes suivantes :

- initialisation du projet ;
- conception préliminaire ;
- conception détaillée ;
- conception finale.

La description détaillée de chacune de ces étapes dépasse largement le cadre de ce chapitre (Azapagic *et al.*, 2004). Le lecteur intéressé peut se reporter aux ouvrages de (Ulrich, 1984 ; Douglas, 1988 ; Biegler *et al.*, 1997). Seul, un tour d'horizon des différentes étapes impliquées en conception classique est abordé ici, en ciblant sur les aspects impliquant les concepts de développement durable (figure 1.6). La conception finale n'est pas considérée étant donné que les aspects liés au développement durable sont susceptibles d'avoir été pris en compte au préalable.

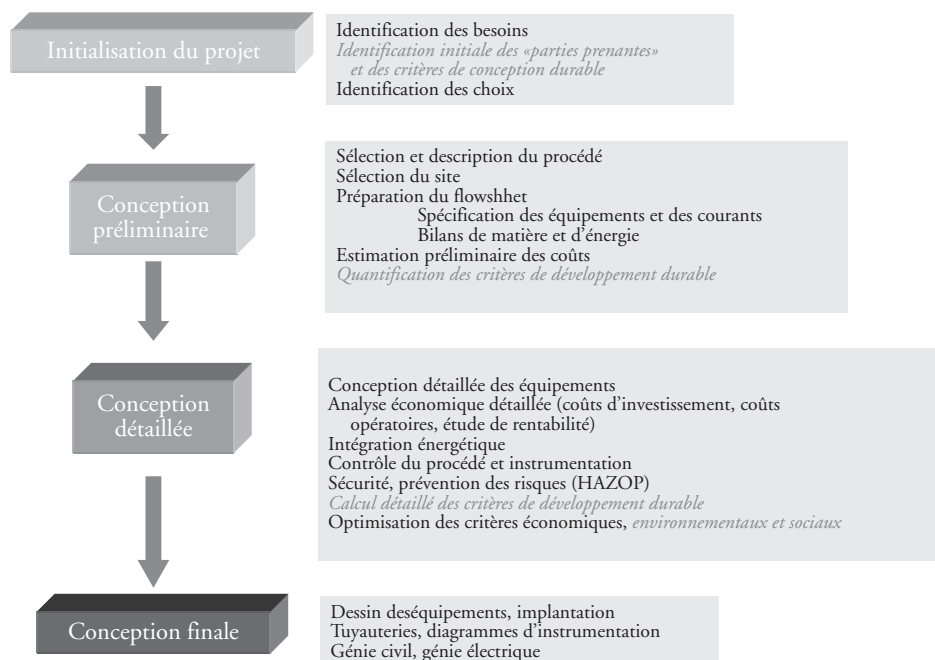


Figure 1.6 – Différentes étapes lors de la conception de procédés durables

1.3.1 Initialisation du projet

Tous les projets d'ingénierie et, donc de conception de procédés, résultent d'un besoin (social) identifié ou d'une opportunité économique (*identification des besoins*). Par exemple, une société chimique peut identifier le besoin de consommateurs pour un certain produit dont la production s'avère rentable. La tâche du concepteur est alors d'imaginer, puis de créer le procédé et le produit correspondants. À ce stade initial de la spécification du projet, il s'agit seulement de dresser l'inventaire des filières possibles de production et les critères de développement durable associés, suffisamment génériques pour s'appliquer à tout type de procédé. Quelques exemples sont proposés dans le tableau 1.1. En identifiant les critères spécifiques au développement durable, le concepteur doit être conscient des différentes « parties prenantes » associées au procédé concerné et aux aspects liés au développement durable qui en découle. Typiquement, elles incluent les employés de la société, qui auront en charge l'exploitation du procédé, les clients, les fournisseurs, les investisseurs, les collectivités avoisinantes et les citoyens, les associations non gouvernementales, les chambres de commerce et d'industrie... Chaque groupe de « parties prenantes » peut avoir ses propres intérêts sur le cycle de vie du procédé, lesquels peuvent être contradictoires. Le concepteur doit être conscient de cette situation et les apprécier en dosant les compromis.

Il faut noter que certains critères de développement durable qui figurent dans le tableau 1.1 sont déjà calculés de façon routinière en conception conventionnelle, particulièrement les critères micro-économiques (e.g. coûts et profits), quelques critères environnementaux (e.g. consommation en énergie et eau) ou sociaux (e.g. santé des employés et sécurité).

À la phase d'initialisation du projet, il s'agit de considérer l'ensemble de ces critères d'un point de vue qualitatif, en identifiant avantages et inconvénients des options envisagées eu égard à ces critères. Ils seront traduits de façon plus concrète et quantitative lors de l'étape préliminaire de conception : ils seront illustrés sur l'exemple de la production du monochlorure de

vinyle largement étudiée dans (Azapagic *et al.*, 2006). Nous en reprenons ici les points clés afin de donner une lecture une vision plus concrète.

On peut insister d'emblée sur le fait que la quantification des émissions et des rejets du procédé est déjà partie intégrante de la conception, en raison des contraintes réglementaires imposées notamment dans l'industrie chimique.

Néanmoins, ces émissions et rejets sont rarement traduits en termes d'impacts potentiels sur l'environnement, ce qui constitue en définitive les facteurs que l'on cherche à déterminer. Par exemple, les émissions de CO₂ participent à l'effet de serre, lequel contribue au réchauffement climatique, alors que les émissions de SO₂ et NO_x contribuent à l'acidification.

Les impacts environnementaux listés dans le tableau 1.1 sont des critères classiques considérés lors d'une analyse environnementale d'activités industrielles et interviennent dans des études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Joliet *et al.*, 2005).

Ce choix initial de critères n'est pas figé et sera revu de façon détaillée lors des étapes suivantes de déroulement du projet : certains critères peuvent être redondants, alors que d'autres non identifiés à ce stade pourront émerger.

L'identification des différentes voies inclut les choix entre filières de procédés, technologies, matières premières, sources d'énergies... À ce stade, de simples flowsheets peuvent être utilisés pour identifier les voies les plus prometteuses. La sélection du procédé a lieu lors de l'étape de conception préliminaire.

Tableau 1.1 – Critères en conception de procédés durables, additionnels aux critères techniques

Critères économiques	Critères environnementaux	Critères sociaux
Micro-économiques	Consommation en énergie	Nombres d'employés
Coût en capital	Consommation en eau	Santé et sécurité du personnel
Coûts opératoires	Rejets en eau	Santé et sécurité des citoyens
Rentabilité	Déchets solides	Santé et sécurité des clients
Coûts de démantèlement	Destruction des ressources biotiques	Nuisance (odeur, bruit, impact visuel et transport)
Macro-économiques	Réchauffement climatique	Acceptation sociale
Valeur ajoutée	Destruction de la couche d'ozone	
Impôts, y compris « taxes vertes » (e.g. taxe carbone)	Acidification	
Investissements (e.g. prévention de la pollution, santé, sécurité, démantèlement)	Brouillard d'été	
Coûts potentiels de responsabilité environnementale	Eutrophisation	
	Toxicité humaine	
	Écotoxicité	

1.3.2 Application au procédé de production de monochlorure de vinyle

■ Identification des parties prenantes

Le monochlorure de vinyle (noté MVC selon l'acronyme anglo-saxon) est un important composé chimique industriel, principalement utilisé pour produire son polymère, le polychlorure de vinyle (PVC).

Cette étude de cas est basée sur la production de 130 000 tonnes par an de MVC. Le schéma de procédé est bien établi (figure 1.7).

Pour plus d'informations, le lecteur peut se reporter à l'ouvrage d'Azapagic *et al.* (2004).

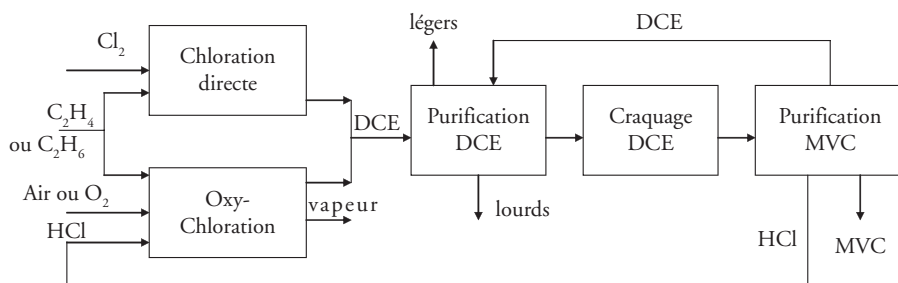


Figure 1.7 – Schéma bloc de la production de monochlorure de vinyle (MVC)

Le MVC est d'abord produit en faisant réagir de l'éthylène et du chlore par chloration directe ainsi que par oxychloration pour produire du dichlorure d'éthylène (DCE) ou 1,2-dichloroéthane.

Chloration directe : $\text{CH}_2 = \text{CH}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{Cl})_2$

Oxychloration : $\text{CH}_2 = \text{CH}_2 + 2 \text{HCl} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{Cl})_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Le DCE ainsi obtenu subit des opérations de lavage et de distillation pour le purifier et le séparer des sous-produits organochlorés produits par des réactions secondaires au niveau de la chloration directe et de l'oxychloration.

Cette étape est suivie par le craquage thermique du DCE pour obtenir du MVC et de l'acide chlorhydrique (HCl). Le MVC est ensuite purifié par séparation du HCl et du DCE non converti qui sont recyclés dans le procédé.

On peut résumer la phase d'identification des parties prenantes à ce projet dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 – Identification des parties prenantes pour le projet MVC

☑ fort intérêt

✓ intérêt

× peu d'intérêt

Parties prenantes	Intérêt vis-à-vis des concepts de développement durable		
	Économique	Environnemental	Social
Investisseurs et assureurs	☑	✓	✓
Employés et sous-traitants	☑	✓	☑
Fournisseurs	☑	×	×
Clients	☑	✓	✓
Collectivités territoriales	✓	☑	☑

■ Identification des choix

Pour ce procédé, plusieurs voies peuvent être envisagées. Elles sont rassemblées dans le tableau 1.3. Un résumé des avantages et inconvénients de chacune des voies est proposé dans le tableau 1.4.

Tableau 1.3 – Identification des choix

+ : avantage

– : inconvénient

Choix concernant l'alimentation	
<i>Remplacer l'éthylène par de l'éthane dans l'étape de chloration directe</i>	
+ / Éthane relativement moins cher Utilisation de sources renouvelables (e.g. biomasse)	– / Perte d'éthane à travers son oxydation et formation de CO ₂
<i>Utiliser de l'air au lieu d'oxygène pur dans l'étape d'oxy-chloration</i>	
+ / Moins cher (séparation de l'air très intensive énergétiquement)	– / Avec O ₂ , taille réduite des équipements, plus faible consommation énergétique, température opératoire plus basse, meilleure efficacité et meilleur rendement
Choix concernant le procédé	
<i>Problème lors de la chloration directe : contamination facile du DCE par le fer (utilisation du catalyseur FeCl₃)</i>	
<i>Formation de β-trichloroéthane (lors de la chloration du DCE)</i>	
<i>Sous-refroidissement : DCE en-dessous de sa température d'ébullition (travailler à 60 °C)</i> + / Moins de β-trichloroéthane mais contamination par le fer + / Réacteur en acier au carbone	<i>Travailler à la température de bulle du DCE : (84 °C, conditions normales)</i> – / Plus de β-trichloroéthane mais + / pas de contamination par le fer + / Pas de lavage et de séchage du DCE requis + / Réacteur en un matériau résistant à la corrosion

Tableau 1.4 – Résumé des avantages et inconvénients des choix (selon les critères considérés)

+ : voie meilleure pour ce critère

– : voie pire pour ce critère

–/+ : voie impliquant à la fois des inconvénients et des avantages pour ce critère

= : indifférence

	Critères économiques			Critères environnementaux			Critères sociaux
Choix	Coût en capital	Coûts opératoires	Gains	Matière & énergie	Émissions & rejets solides	Impacts	Santé & sécurité
<i>Ethylène</i>	=	–	–/+	=	+	+	=
<i>Éthane</i>	=	+	–/+	=	–	–	=
<i>Oxygène</i>	+	–/+	+	–/+	–	–	–
<i>Air</i>	–	–/+	–	–/+	+	+	+
<i>Sous refroidissement</i>	+	=	=	+	–	=	=
<i>Température de bulle</i>	–	=	=	–/+	+	=	=

À ce stade, le concepteur peut mettre en œuvre des méthodes d'analyse multicritère, comme Electre ou Prométhée (Schärlig, 1996).

1.3.3 Conception préliminaire

Une approche classique, largement utilisée en conception de procédés, est la méthode hiérarchique de Douglas (1988), où la conception est effectuée en appliquant une succession hiérarchique de décisions, impliquant la sélection d'un procédé continu ou discontinu, le

développement d'un bilan entrée-sortie incluant les recyclages dans le flowsheet, le développement de la structure générale du système de séparations et du réseau d'échangeurs de chaleur. Cette démarche est suivie d'une évaluation économique préliminaire. Ces étapes sont brièvement décrites ci-après.

■ Sélection et description du procédé

La sélection du procédé est une décision importante qui va affecter toutes les étapes suivantes. Il est donc primordial qu'elle soit prise en considérant autant de critères décisionnels que possible, à partir des critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux identifiés au stade précédent. Le choix final sera basé sur un compromis entre les diverses solutions, car il est peu probable que l'on puisse décider de façon tranchée. Le procédé choisi doit être décrit avec suffisamment de détails pour préparer le flowsheet : description de la chimie impliquée, conditions opératoires du procédé, alimentations et sources d'énergie utilisées, produits et co-produits, sous-produits... Le type d'émissions et de rejets solides doit également être spécifié. Au préalable, il importe de choisir le site approprié pour implanter l'unité.

■ Sélection du site

Le problème de la sélection du site, à considérer seulement lors de la conception d'unités nouvelles, est important pour plusieurs raisons : d'une part, d'un point de vue opérationnel et économique, il faut que le site soit accessible, ait une infrastructure adaptée, soit proche de l'accès aux matières premières, aux utilités et à la main d'œuvre ainsi que bien connecté pour anticiper de futurs marchés ; d'autre part, il est important que le site soit acceptable des points de vue environnemental et social, de façon à ne pas avoir d'opposition du public ou d'une collectivité, par exemple. Dans beaucoup de pays, une Analyse de l'Impact Environnemental (Environmental Impact Assessment, EIA) est requise pour l'implantation d'un nouveau procédé ou sa modification (en Europe, l'EIA est régulé par la directive européenne 97/11/EC) de façon à ce que le concepteur choisisse un site minimisant les impacts environnementaux et sociaux qui en relèvent.

■ Préparation du flowsheet

Le flowsheet montre la séquence du procédé, les équipements interconnectés et établit les bilans de matière et d'énergie. Il sert de support à l'estimation des coûts. Plusieurs logiciels de flowsheeting sont disponibles pour aider à la préparation du flowsheet et la simulation du procédé (Aspen, ProSim, Chemcad...).

■ Estimation préliminaire des coûts

Cette étape implique un calcul préliminaire des coûts en capital et des coûts opératoires du procédé, lesquels sont généralement à $\pm 20\text{-}30\%$ des coûts réels (Chauvel *et al.*, 2001). Ce niveau de précision est généralement suffisant à ce stade pour démontrer la faisabilité économique du projet ou choisir entre plusieurs voies. Une estimation plus fine sera effectuée lors de l'étape de conception détaillée et permettra de valider le procédé.

■ Estimation des critères de développement durable

Les critères qualitatifs de développement durable identifiés lors de la phase d'initialisation du projet doivent à présent être traduits en mesures appropriées des performances économiques, environnementales et sociales. Ces mesures sont identifiées en tant qu'indicateurs ou métrique de développement durable. Ces indicateurs s'expriment en unités monétaires, de masse ou d'énergie.

□ Critères économiques

Les critères économiques en conception classique sont usuellement basés sur les critères microéconomiques tels que :

- le Bénéfice Actualisé ;

$$B_{act} = -I - f + \sum_{p=1}^n \frac{(V_p - D_p - A_p)(1-a) + A_p}{(1+i)^p} + \frac{f + I_r}{(1+i)^n} \quad (1.1)$$

avec:

I : investissement global

f : fonds de roulement

V_p : recettes annuelles

D_p : dépenses annuelles

A_p : amortissement

a : taux d'imposition

i : taux d'actualisation

I_r : valeur résiduelle de l'installation

n : durée de vie de l'installation

- le Temps de Retour sur l'Investissement, défini par l'année k au bout de laquelle on récupère l'investissement de départ ;

$$\sum_{p=0}^k \frac{(M.B.A.)_p}{(1+i)^p} = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{Avec } MBA_p = (V_p - D_p - A_p)(1-a) + A_p \quad (1.3)$$

MBA_p désigne la marge brute d'autofinancement de l'année p .

- le taux de Rentabilité Interne, défini comme la valeur particulière du taux d'actualisation i_r telle que :

$$\sum_{p=0}^n \frac{(M.B.A.)_p}{(1+i_r)^p} = 0 \quad (1.4)$$

Ces critères sont très classiques et le lecteur peut se reporter à l'ouvrage de (Chauvel *et al.*, 2001). À ce stade, il importe de prendre en compte les coûts de démantèlement et les coûts de prévention de la pollution, même s'il s'agit d'une évaluation grossière. Lors d'une conception classique, si l'évaluation économique s'avère favorable, on peut passer à une étude plus détaillée ($\pm 10-15\%$) impliquant le dimensionnement du procédé. En conception durable, il importe d'évaluer les deux autres dimensions du développement durable, environnementale et sociale.

L'ICHEME (Institution of Chemical Engineers) préconise également d'aller plus loin dans la description de la valeur, sa distribution et son investissement, considérant le capital humain et financier. Nous présentons dans le tableau 1.5 l'ensemble de ces critères (ICHEME, 2003).

Tableau 1.5 – Critères économiques recommandés par l'IChemE (2003)

Critères économiques	Bénéfice, valeur, impôt	Valeur ajoutée (€/an) Valeur ajoutée par unité de valeur des ventes (€/€) Valeur ajoutée par employé direct (€/an) Marge brute par employé direct (€/an) Retour par rapport au capital moyen utilisé (%/an) Impôts payés, en pourcentage du bénéfice net avant impôt (%)
	Investissement	Pourcentage d'augmentation (diminution) du capital utilisé (%/an) Dépenses R&D % des ventes (%) Employés avec une qualification post bac (%) Nouvelles embauches/nombre d'employés directs (%/an) Dépense de formation en pourcentage des dépenses salariales (%) Ratio embauches indirectes/nombre d'employés directs Dons en pourcentage du bénéfice net avant impôt (%)

□ Critères environnementaux

La littérature fait état de différentes métriques environnementales. Nous retenons ici trois approches qui illustrent des points de vue différents et qui nous semblent pertinentes en conception de procédés : l'IChemE, l'indice SPI, l'approche exergétique.

Métrique de l'IChemE

Une première voie, déjà évoquée, (tableau 1.6) implique deux types d'indicateurs quantitatifs, i.e., les fardeaux environnementaux et les impacts. Le premier groupe inclut l'utilisation de matière et d'énergie, les émissions dans l'air et l'eau, la quantité de déchets solides. Il est obtenu à partir du flowsheet et des bilans de matière et d'énergie. L'information obtenue sur les fardeaux peut ensuite être exploitée pour calculer les impacts environnementaux.

La plupart des indicateurs de la métrique sont calculés sous forme de ratios pour fournir une mesure d'impact indépendante de l'échelle de l'opération. Ils sont basés sur une règle simple : le procédé est d'autant plus efficace que l'indicateur est faible.

Ils impliquent à la fois les entrées du procédé (utilisation des ressources) et les sorties (émissions, effluents, rejets, produits et services). Ils font intervenir un sous-ensemble des facteurs d'impact utilisés en science de l'environnement les plus significatifs vis-à-vis des industries de procédés, en vue du calcul de fardeaux environnementaux.

Le fardeau environnemental (FE), causé par l'émission d'une gamme de substances, est calculé en additionnant les émissions pondérées de chaque substance. Le facteur de potentiel d'impact est identifié comme étant le facteur d'impact de chaque substance. Notons qu'une substance peut contribuer différemment à différents fardeaux environnementaux et avoir différents facteurs d'impacts.

$$FE_i = \sum M_N FP_{i,N} \quad (1.5)$$

avec :

- FE_i = fardeau environnemental i
- M_N = masse de la substance émise N
- $FP_{i,N}$ = facteur de potentiel d'impact de la substance N relatif au fardeau environnemental i

Les fardeaux environnementaux sont déterminés par rapport à une substance de référence (par exemple SO_2 , pour l'acidification atmosphérique).

Cette approche implique au total 49 indicateurs. On peut lui objecter que la durée de vie des produits chimiques dans divers milieux n'est pas prise en compte. De plus, l'indicateur sur la santé humaine est limité aux effets cancérogènes et normalisé par rapport au benzène.

Nous recommandons la lecture de deux articles qui présentent la méthode pour deux applications didactiques, la production de benzène par hydrodésalkylation du toluène (Jensen *et al.*, 2003) et celle du monochlorure de vinyle (Carvalho *et al.*, 2008 ; Azapagic *et al.*, 2004).

C'est pourquoi l'approche environnementale est menée le plus souvent par une Analyse de Cycle de Vie (ACV) (Joliet *et al.*, 2005). Le cas du monochlorure de vinyle est également décliné selon cette voie (Azapagic *et al.*, 2004).

Indice SPI « Sustainable Process Index »

Krotscheck et Narodoslawsky (1995) proposent le calcul d'un indice baptisé *SPI* qui est la traduction du concept d'empreinte écologique pour un procédé : c'est un indicateur agrégé qui mesure l'impact environnemental total d'activités humaines diverses. Le calcul du *SPI* est basé sur les bilans de masse et d'énergie du procédé. Il est indépendant des normes légales qui peuvent varier dans le temps, ce qui le rend particulièrement attractif. L'objectif du *SPI* est de comparer les flux de matière et d'énergie induits par l'activité humaine aux flux de matière naturels, à une échelle tant globale que locale. Dans cette approche, la planète est vue comme un système thermodynamiquement « ouvert », c'est-à-dire ouvert au flux de radiations solaires vers sa surface et qui émet de l'énergie dans l'univers. Les radiations solaires sont les seules forces motrices naturelles pour tous les processus de l'environnement et ceux issus de l'activité humaine. Elles constituent un flux limité, bien que disponible indéfiniment, reçu par la surface de la planète. Cela signifie que tous les procédés naturels ou induits par l'activité humaine nécessitent une certaine fraction de ce flux limité et requièrent une certaine surface : en d'autres termes, les procédés technologiques sont en compétition les uns avec les autres et avec les procédés naturels pour cette surface, qui est une ressource limitée. L'activité humaine exerce des impacts sur l'environnement de différentes façons : tout procédé considéré au sein d'une analyse « du berceau à la tombe » nécessite des matières premières, de l'énergie, des installations, emploie du personnel et rejette des déchets ou des émissions dans l'environnement. La superficie totale [m^2] pour intégrer de façon durable un procédé spécifique dans l'écosphère est donc donnée par :

$$A_{tot} = A_{MP} + A_E + A_I + A_S + A_D \quad (1.6)$$

où A_{MP} représente la surface pour l'extraction des matières premières ; A_E la surface relative à la ressource en énergie, A_I l'aire relative aux installations, A_S la surface pour prendre en compte le personnel et A_D la surface pour dissiper tous les déchets et émissions.

Les procédés ne sont pas des fins en soi mais produisent des services ou des biens. Il est alors intéressant de déterminer l'impact par unité de bien ou de service représenté par une aire spécifique a_{tot} .

$$a_{tot} = \frac{A_{tot}}{N_p} \quad (1.7)$$

où N_p spécifie le nombre de biens ou de services produits par le procédé, e.g. la quantité de kWh produit par un système énergétique spécifique. La période de référence est généralement une année.

Tableau 1.6 – Critères environnementaux recommandés par l'ICHEME

Critères environnementaux	Émissions, effluents et rejets	Eau	Écotoxicité par rapport à la vie aquatique (métaux); (en équivalent Tonne cuivre) Écotoxicité par rapport à la vie aquatique (autres substances); (en équivalent Tonne formaldéhyde) Eutrophisation (en équivalent Tonne PO_4^{3-}) Acidification aquatique (en équivalent Tonne H^+ libéré) Demande aquatique en oxygène (en équivalent Tonne oxygène)
			Acidification atmosphérique (en équivalent Tonne SO_2) Effet cancérigène (en équivalent Benzène) Épuisement couche Ozone (en équivalent Tonne CFC-11) Réchauffement climatique (en équivalent Tonne CO_2) Pollution photochimique (en équivalent Tonne C_2H_4)
	Utilisation des ressources	Énergie	Utilisation énergie primaire totale nette = entrée – sortie (GJ/an) % Énergie primaire totale nette à partir de sources renouvelables Énergie primaire totale (kJ/par kg de produit) Énergie primaire totale par unité de valeur ajoutée (kJ/€)
			Quantité totale de matières premières utilisées (par kg de produit, kg/kg) Quantité totale de matières premières utilisées (par unité de valeur ajoutée kg/€) Fraction de matières premières recyclées dans l'usine (kg/kg) Fraction de matières premières recyclées par les consommateurs (kg/kg) Matières premières dangereuses (par kg de produit, kg/kg)
		Eau	Consommation nette d'eau utilisée (par kg de produit, kg/kg) Consommation nette d'eau utilisée (par unité de valeur ajoutée, kg/€)
		Sol	Utilisation du sol (m^2) Déchets (Tonnes de déchets)

Finalement, on peut relier cette aire spécifique pour la production d'un certain bien ou service à l'aire statistiquement disponible par personne pour fournir les biens ou services de façon durable. Ce rapport définit l'indice *SPI* :

$$SPI = \frac{a_{tot}}{a_{in}} \quad (1.8)$$

où a_{in} est la surface disponible relative à la fourniture annuelle de biens et d'énergie par personne. Elle est généralement estimée en divisant l'aire totale d'une région par le nombre annuel de ses habitants.

En pratique, le *SPI* désigne quelle fraction de l'aire théoriquement disponible par personne pour garantir sa subsistance dans des conditions durables est utilisée pour la production ou le service en question : plus le *SPI* (ou a_{tot}) est faible, plus l'impact sur l'écosphère est faible pour fournir le bien ou le service.

Un point clé de l'évaluation du *SPI* est de pouvoir spécifier et comparer les différents impacts d'une technologie.

Une description détaillée du calcul et de l'application du *SPI* dépasse largement le cadre de ce chapitre. Le lecteur peut se référer aux articles de (Narodoslawsky et Krotscheck, 1995; Krotscheck et Narodoslawsky, 1996) qui illustrent la démarche.

Un cas d'étude intéressant de cet indicateur est proposé par (Steffens *et al.*, 1999) pour le cas d'un bioprocédé (production de pénicilline).

Approche exergetique

La comptabilité exergetique (Dewulf *et al.*, 2008) est une autre voie pour quantifier globalement les ressources consommées et les émissions dans l'environnement dans la mesure où il s'agit d'une grandeur physique qui peut intégrer les transferts de matière et d'énergie. L'analyse exergetique est basée sur l'association du premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) et du second principe (création d'entropie, prise en compte des irréversibilités et de la dégradation de l'énergie) (Ahern, 1980; Bejan *et al.*, 1996). En raison de la génération d'entropie, l'énergie disponible dans les produits sortants (exergie des produits sortants) est inférieure à celle disponible dans les ressources. Cette dégradation de la qualité, quantifiable par la destruction d'exergie (figure 1.8), intervient dans les procédés physico-chimiques, qu'ils interviennent dans l'écosystème naturel (production de biomasse par exemple) ou dans l'écosystème industriel (production, consommation...).

Les premières applications de l'analyse exergetique datent des années 1980 et ont surtout porté sur l'analyse des systèmes industriels. La recherche dans ce domaine comprend à la fois des développements méthodologiques et des applications à des procédés industriels spécifiques et à leur chaîne logistique. Sur le premier point, on peut noter que de nombreuses études ont été menées sur la combinaison de méthodes d'analyse exergetique et de pincement (« pinch ») (Sorin et Paris, 1999; Dhole et Zheng, 1995; Feng et Zhu, 1997; Rucker et Gruhn, 1999). La consommation d'exergie cumulée (CExC) étend l'analyse exergetique au-delà du simple procédé pour considérer tous les processus, depuis l'extraction des ressources naturelles jusqu'au produit final. Là encore, l'intérêt majeur de cette analyse globale est de fournir des indications pour des améliorations d'un des procédés impliqués et de comparer plusieurs voies (Morris, 1991; Szargut et Morris, 1987).

Des systèmes d'aide à la décision et des techniques basées sur la combinaison des concepts exergetiques et d'analyse économique ont été également développés, aboutissant à un coût exergetique.

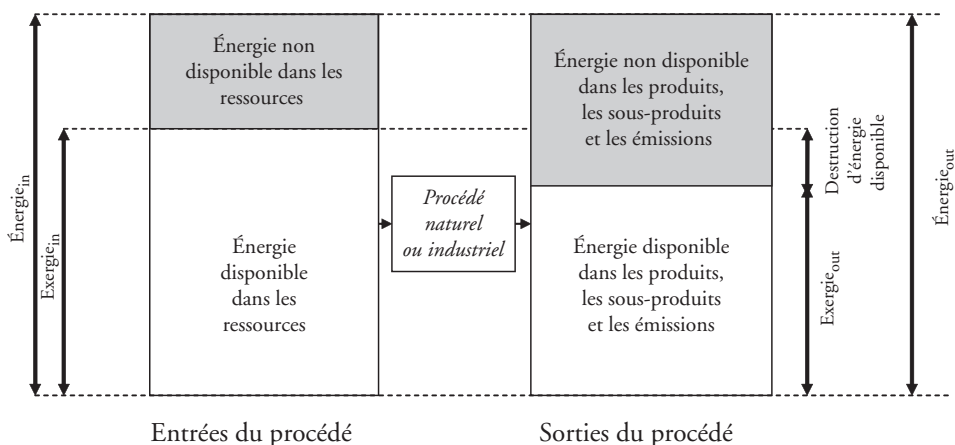


Figure 1.8 – Analyse d'un procédé à partir des lois fondamentales de la thermodynamique. Le premier principe établit la conservation des énergies entrante et sortante du procédé ($\text{énergie}_{\text{in}} = \text{énergie}_{\text{out}}$); le second principe établit que l'énergie disponible ou exergie dans les produits, sous-produits et émissions est inférieure à celle mise en jeu dans les ressources ($\text{exergie}_{\text{in}} > \text{exergie}_{\text{out}}$)

L'analyse exergétique a été appliquée à une variété de procédés de conversion d'énergie et de procédés chimiques, comparant notamment diverses filières énergétiques (Dewulf *et al.*, 2005 ; Dewulf et Van Langenhove, 2006). Elle s'avère particulièrement intéressante pour des systèmes de cogénération, car elle place sur un même plan énergétique les diverses sources d'énergie mises en jeu (Gomez *et al.*, 2007 ; Kanoglu et Dincer, 2009).

Critères sociaux

Les critères sociaux peuvent être traduits en indicateurs quantitatifs et qualitatifs. Sur cet aspect également, nous présentons les recommandations de l'ICHEME (tableau 1.7).

Notons que, pour les critères sociaux relatifs à la conception du procédé, des méthodes quantitatives ont été développées. Par exemple, pour évaluer le risque sur la santé lié à la toxicité de substances dans l'industrie chimique, on utilise la dose létale 50 ou DL50 (LD50 en anglais pour *Lethal Dose 50*). Cet indicateur mesure la dose de substance causant la mort de 50 % d'une population animale donnée (souvent des souris ou des rats) dans des conditions d'expérimentation précises. Egalement, pour étudier les risques d'incendie et d'explosion, on peut utiliser l'indice de Dow Chemical (Sinnott, 2000).

Une étude intéressante proposée par (Carvalho *et al.* 2008) sur le cas du monochlorure de vinyle mentionne une série d'indices de sécurité du procédé issue des travaux de (Heikkilä, 1999).

Tableau 1.7 – Critères sociaux recommandés par l'ICHEME

Critères sociaux	Situation de l'emploi	Bénéfices en % des dépenses salariales (%) Rotation des employés (%) Nombre de promotions/nombre d'employés (%) Heures de travail perdues en % du nombre total d'heures (%) Ratio Revenu + bénéfice (10 % meilleur/10 % pire)
	Santé & sécurité au travail	Fréquence du temps perdu en raison d'accidents Dépenses en prévention maladies et accidents/dépenses salariales (€/€)
	Société	Nombre de réunions de parties prenantes par unité de valeur ajoutée (€/€) Bénéfice indirect pour la communauté par unité de valeur ajoutée (€/€) Nombre de plaintes par unité de valeur ajoutée (€/€) Nombre d'actions légales par unité de valeur ajoutée (€/€)

1.3.4 Conception détaillée

La conception détaillée suit l'étude préliminaire. Dans un design conventionnel, cette étape implique normalement les aspects suivants :

- conception détaillée des équipements (réacteurs, colonnes de distillation, échangeurs...);
- analyse économique détaillée à une précision $\pm 5-10\%$ (coûts d'investissement, coûts opératoires, étude de rentabilité);
- intégration énergétique;
- optimisation du procédé;
- contrôle du procédé et instrumentation;
- sécurité, prévention des risques (HAZOP).

Au stade de l'analyse, il importe de procéder à une analyse intégrée des performances économique, environnementale et sociale. L'aspect environnemental nécessite une analyse de type ACV (figure 1.9) à partir des informations du flowsheet du procédé.

La présentation de la démarche d'une ACV dépasse également le cadre de ce chapitre. Le lecteur trouvera toute l'information nécessaire pour comprendre et analyser une ACV dans l'ouvrage de (Joliet *et al.*, 2005). Indiquons que des logiciels d'ACV ont été largement développés (SimaPro, Gabi, Umberto).

L'intégration des trois composantes du développement durable peut s'effectuer grâce à une optimisation du procédé. Des méthodes d'optimisation variées allant de simples méthodes analytiques à des méthodes sophistiquées de programmation mixte non linéaires ont été utilisées en conception de procédés. Pendant longtemps, cette dernière a été effectuée en optimisant un seul critère, de nature économique. Un des principaux enjeux en conception de procédés durables vise à développer des méthodes d'optimisation multiobjectif : les stratégies d'optimisation qui peuvent être mises en jeu font l'objet du chapitre suivant de cet ouvrage. Comme le montre la figure 1.6, la conception détaillée de l'unité est suivie de la conception finale du procédé (Sinnott, 2000).

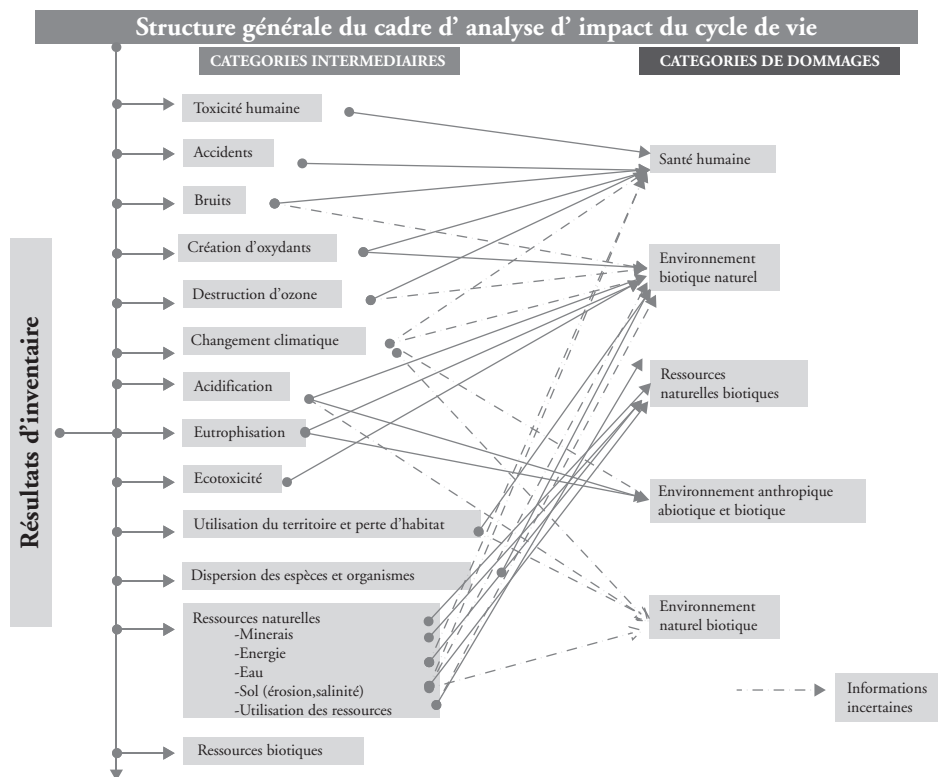


Figure 1.9 – Structure générale du cadre d'analyse d'impact du cycle de vie selon (Joliet *et al.*, 2005)

Martine Poux
Patrick Cognet
Christophe Gourdon

GÉNIE DES PROCÉDÉS DURABLES

Du concept à la concrétisation industrielle

Cet ouvrage propose un ensemble de méthodes et de nouvelles voies dans le domaine du génie des procédés pour mettre en place des procédés plus sûrs, plus économes en matières premières et en énergie, et plus acceptables du point de vue de la préservation de l'environnement.

Il traite de manière détaillée les différents niveaux d'approche pour rendre les procédés plus performants :

- l'éco-conception et l'optimisation du procédé par approche systémique ;
- l'introduction de nouvelles technologies d'intensification ;
- la modification radicale du procédé en proposant de nouveaux milieux et de nouvelles voies de synthèse.

Toutes les notions abordées sont illustrées d'exemples et de réalisations industrielles, donnant un caractère très appliqué à cet ouvrage.

Ce concept de « génie des procédés durables » est développé ici de façon à donner toutes les bases nécessaires aux ingénieurs et techniciens de recherche et développement, mais aussi de production. L'ouvrage s'adresse également aux enseignants et étudiants de 2^e et 3^e cycle, dans un spectre large de disciplines alliant chimie, biotechnologie et génie des procédés.

GESTION INDUSTRIELLE

CONCEPTION

FROID ET GÉNIE CLIMATIQUE

MÉCANIQUE ET MATÉRIAUX

CHIMIE

ENVIRONNEMENT ET SÉCURITÉ

EEA

AGROALIMENTAIRE

MARTINE POUX

est ingénieur de recherche
au Laboratoire de génie
chimique de Toulouse
(Institut national
polytechnique/CNRS/
Université Paul Sabatier).

PATRICK COGNET et
CHRISTOPHE GOURDON

sont professeurs à
l'École nationale
supérieure des ingénieurs
en arts chimiques
et technologiques
(ENSIACET) de Toulouse
et au Laboratoire de
génie chimique de
Toulouse (Institut national
polytechnique/CNRS/
Université Paul Sabatier).



9 782100 516056

6674733

ISBN 978-2-10-051605-6

L'USINE NOUVELLE

